



Europäisches
Patentamt

European
Patent Office

Office européen
des brevets



Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterla-
gen stimmen mit der
ursprünglich eingereichten
Fassung der auf dem näch-
sten Blatt bezeichneten
europäischen Patentanmel-
dung überein.

The attached documents
are exact copies of the
European patent application
described on the following
page, as originally filed.

Les documents fixés à
cette attestation sont
conformes à la version
initialement déposée de
la demande de brevet
européen spécifiée à la
page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

97113436.6

**CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT**

Der Präsident des Europäischen Patentamts;
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets
p.o.

H.I. Block
H.I. Block



Europäisches
Patentamt

European
Patent Office

Office européen
des brevets

Blatt 2 der Bescheinigung
Sheet 2 of the certificate
Page 2 de l'attestation

Anmeldung Nr.:
Application no.:
Demande n°: 97113436.6

Anmeldetag:
Date of filing: 04/08/97
Date de dépôt:

Anmelder:
Applicant(s):
Demandeur(s):
Pirelli Cavi e Sistemi S.p.A.
20126 Milan
ITALY

Bezeichnung der Erfindung:
Title of the invention:
Titre de l'invention:

System and method of high-speed transmission and appropriate transmission apparatus

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed / Priorité(s) revendiquée(s)

Staat:
State:
Pays:

Tag:
Date:
Date:

Aktenzeichen:
File no.
Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation:
International Patent classification:
Classification internationale des brevets:
H04B10/155

Am Anmeldetag benannte Vertragsstaaten:
Contracting states designated at date of filing: AT/BE/CH/DE/DK/ES/FI/FR/GB/GR/IE/IT/LI/LU/MC/NL/PT/SE
Etats contractants désignés lors du dépôt:

Bemerkungen:
Remarks:
Remarques:

The title of the invention in Italian reads as follows: "Sistema e metodo di trasmissione ad alta velocità e relativo apparato di trasmissione"

Sistema e metodo di trasmissione ad alta velocità e relativo apparato di trasmissione.

5 Nel campo delle telecomunicazioni in fibra ottica di tipo digitale, oltre alla possibilità di utilizzare tecniche di tipo convenzionale (usualmente indicata come "Non-Return-to-Zero", o NRZ, in cui sostanzialmente si trasmette un valore di 1 o 0 per l'intero periodo corrispondente alla velocità di cifra adottata), esiste la possibilità di sfruttare una tecnologia di trasmissione di tipo ad impulsi, ad esempio di tipo "solitonico" o "simil-solitonico" (soliton-like),
10 (usualmente indicata come "Return-to-Zero", o RZ), in cui sostanzialmente si trasmette una sequenza di impulsi, ciascuno di durata inferiore al periodo corrispondente alla velocità di cifra adottata, modulati in base all'informazione digitale da trasmettere.

15 Uno dei maggiori problemi che si incontrano nella progettazione di un sistema di trasmissione RZ consiste nella difficoltà di generare degli impulsi con profilo RZ che risultino adatti a tale tipo di trasmissione, e, in particolare, aventi adeguata durata temporale e non affetti da "chirp".

20 Tra le tecniche utilizzate per questo scopo sono noti, ad esempio, i laser in fibra in regime di concatenamento modale (mode-locking) ed i modulatori ad elettroassorbimento, oltre ad altre tecniche.

25 Una caratteristica comune alle tecniche suddette consiste nel fatto che esse sono efficaci per la generazione di impulsi particolarmente corti, adatti alla trasmissione su fibre a dispersione spostata (dispersion shifted) o DS, cioè fibre aventi dispersione cromatica che si avvicina a zero nella banda di lunghezze d'onda impiegata per le telecomunicazioni, intorno a 1550 nm, come ad esempio definito dalla Raccomandazione ITU-T G653 1993, ed alla moltiplicazione ottica a divisione di tempo.

30 Nel caso di trasmissione su fibre cosiddette a salto d'indice (step-index), o SI, (come ad esempio descritte nelle Raccomandazioni ITU-T G650 1993 e G652 1993) e con compensazione della dispersione, risulta utile avere a

disposizione impulsi abbastanza lunghi (ad esempio con durata da 20 a 60 ps per una frequenza di trasmissione di 10 Gbit/s), mentre si è osservato che con impulsi di minor durata in detti sistemi con fibra SI, ad alta dispersione, si osservano fenomeni di generazione di onde dispersive, che portano, in definitiva, ad un aumento del tasso di errore della trasmissione (BER).

I modulatori ad elettroassorbimento, inoltre, sono intrinsecamente soggetti a generare impulsi affetti da "chirp".

Per "chirp" si intende una variazione di frequenza del segnale nel corso della sua modulazione in ampiezza, tale che si ha una frequenza (centrale) del segnale diversa all'inizio dell'impulso rispetto alla frequenza (centrale) del segnale alla fine dell'impulso stesso.

Il brevetto WO 9616345 descrive un apparato che utilizza due modulatori di ampiezza controllati da due tensioni di modulazione concatenate in fase (phase-locked), con frequenze l'una il doppio dell'altra, in cui la maggiore è la velocità di ripetizione di impulso.

L'articolo di IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 2, n. 2, Giugno 1996 (Veselka ed altri) descrive un apparato che comprende più modulatori di intensità pilotati sinusoidalmente collegati in serie per formare impulsi.

Il brevetto EP 622916 descrive un generatore di solitoni che comprende un modulatore di fase e un modulatore di ampiezza, rispettivamente pilotati con la frequenza di ripetizione degli impulsi e con una frequenza inferiore armonicamente correlata.

Il brevetto EP 718990 descrive un dispositivo di conversione di un flusso di dati di tipo NRZ in un flusso RZ, che impiega un modulatore ad interferometro di Mach-Zehnder o un accoppiatore direzionale.

Il brevetto US 5157744 descrive un generatore di solitoni che comprende un modulatore di ampiezza ad interferometro di Mach-Zehnder con una serie multipla di elettrodi distribuiti, pilotati con frequenze armonicamente correlate.

Il brevetto riporta che il processo di combinare più segnali ad alta frequenza in

un singolo segnale comporta grandi attenuazioni e necessità di amplificazione, e che la trasmissione ed elaborazione del segnale finale, che è un composito di molti segnali ad alta frequenza, è estremamente difficile. Inoltre, se il segnale composito richiede amplificazione, è richiesto un
5 amplificatore assai costoso, atto ad amplificare uniformemente molte frequenze assai alte. L'invenzione di US 5157744 è diretta ad un generatore di solitoni che evita tali problemi.

D. Le Guen ed altri, in OFC 97 PD17(1-3), descrivono un esperimento su sistema solitonico WDM con 10 canali a 20 Gbit/s, con compensazione di
10 dispersione cromatica e pre-chirping, in cui una linea di 1000 chilometri di fibra a salto di indice con tratte da 100 chilometri è stata simulata mediante un anello di ricircolazione di 102 chilometri. La trasmissione usa modulatori ad elettroassorbimento per modulare l'emissione delle sorgenti laser per generare impulsi da 20 ps, successivamente codificati da un modulatore in
15 niobato di litio.

F.M. Knox ed altri, in ECOC 96, WeC3.2, 3.101-3.104, descrivono un esperimento di trasmissione solitonica a 10 Gbit/s, con compensazione di dispersione cromatica, su più di 2022 chilometri di fibra a salto di indice; l'esperimento ha impiegato impulsi a $\text{sech}^2(t)$ di circa 20 ps a 2,5 GHz,
20 generati da un laser ad anello in fibra ad erbio a concatenamento modale attivo, modulati con una sequenza di bit pseudo-casuale da un modulatore di ampiezza in niobato di litio e intercalati due volte per dare un flusso di dati a 10 Gbit/s, iniettati in un anello ricircolante di 33 chilometri con un relativo modulo di compensazione di dispersione cromatica.

Secondo un aspetto della presente invenzione, si è trovato che, applicando ad un modulatore di un segnale ottico un segnale di pilotaggio costituito da un segnale periodico ad una frequenza, combinato con almeno una armonica di detto segnale periodico, è possibile generare impulsi di ampiezza adatta alla comunicazione ottica ad impulsi, di tipo solitonico o simili.

30 Nell'ambito della presente invenzione, si è trovato che impulsi ottici, di tipo

solitonico o simile, possono essere usati in una linea comprendente fibra ad alta dispersione (ad esempio le suddette fibre SI) e mezzi di compensazione della dispersione cromatica, in cui si ha un primo tratto con elevata potenza di segnale, in cui il segnale stesso si propaga in regime di auto-modulazione di fase (SPM, Self Phase Modulation), senza sostanzialmente subire gli effetti della dispersione cromatica; ed un successivo tratto, in cui il segnale si propaga in regime lineare, consentendo la compensazione della sua dispersione cromatica con i tradizionali mezzi di compensazione.

In tal modo, nel tratto in cui effetti di dispersione non sarebbero compensabili, a causa della potenza del segnale, suscettibile di causare fenomeni non-lineari tali da pregiudicare la possibilità di compensare la dispersione, la compensazione stessa non è richiesta, grazie all'impiego di impulsi con propagazione in condizioni solitoniche; nel tratto in cui invece in cui la potenza del segnale è scesa sotto il livello tale da consentire la riconfigurazione temporale degli impulsi (o "reshaping" solitonico), la compensazione della dispersione può avere luogo.

Per auto-modulazione di fase, si intende una combinazione di effetti non lineari, associati alla propagazione di un segnale di intensità superiore ad un certo valore in condizioni guidate in un mezzo conduttore ottico dispersivo, tali per cui la dispersione cromatica del mezzo sostanzialmente si compensa ed il profilo temporale dell'impulso medesimo si mantiene inalterato.

Nel caso di propagazione in fibra di un segnale di data potenza P , l'intensità del segnale è $I = P/A_f$, dove A_f è l'area della sezione associata alla propagazione del segnale nella fibra.

Secondo la presente invenzione si è trovato che impulsi ottici di caratteristiche adatte alla propagazione in una linea ottica per una trasmissione di tipo RZ potevano essere generati modulando un segnale ottico continuo mediante un modulatore sostanzialmente privo di chirping, purché il segnale di pilotaggio del modulatore risulti comprendere almeno una frequenza ed una sua armonica sovrapposti tra loro.

Secondo la presente invenzione si è inoltre trovato che un sistema ottico di trasmissione ad alta velocità può essere reso indipendente dal tipo di trasmettitore o di segnali ad esso inviati, se esso comprende una unità di adattamento ricevente gli impulsi ottici originali ed in grado di generare
5 corrispondenti segnali ad impulsi, di tipo RZ.

In particolare, in un primo aspetto, la presente invenzione riguarda un trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, che comprende:

- un primo modulatore ottico di segnale;
- un secondo modulatore ottico di impulsi, otticamente collegato a detto
10 primo modulatore ottico di segnale;
- un generatore di un segnale ottico continuo, otticamente collegato a detti primo e secondo modulatore ottico;
- mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale con un segnale elettrico recante una informazione codificata con una
15 frequenza di ripetizione prefissata;
- mezzi di pilotaggio di detto secondo modulatore, comprendenti un elemento combinatore di un primo segnale elettrico periodico a detta frequenza prefissata e di almeno un secondo segnale elettrico periodico a una seconda frequenza che è una armonica di detta
20 frequenza prefissata.

Preferibilmente, detti mezzi di pilotaggio di detto secondo modulatore comprendono un circuito di generazione di detto primo segnale elettrico periodico a detta frequenza prefissata, pilotato da un segnale di clock associato a detto segnale elettrico recante una informazione, ed un circuito di
25 generazione di detto secondo segnale elettrico periodico a detta seconda frequenza, armonica di detta frequenza prefissata.

In particolare, detto circuito di generazione di detto secondo segnale elettrico periodico a detta seconda frequenza, armonica di detta frequenza prefissata comprende un moltiplicatore di frequenza, collegato a detto circuito di
30 generazione di detto primo segnale elettrico periodico.

Preferibilmente, detti mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale con un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata sono essenzialmente costituiti da un circuito di alimentazione di un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata a detto primo modulatore ottico.

In una forma di realizzazione, detti mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale con un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata comprendono un circuito di generazione di detto segnale elettrico recante una informazione codificata, in risposta ad un segnale esterno.

Preferibilmente, detto circuito di generazione di detto primo segnale elettrico periodico a detta frequenza prefissata, pilotato da detto segnale di clock, comprende una uscita recante un segnale di sincronizzazione, in prefissata relazione temporale con detto segnale di clock, collegata a detti mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale.

Preferibilmente, detti mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale con un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata comprendono un circuito di decisione, ricevente detto segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata e detto segnale di clock.

Preferibilmente, che detto elemento combinatore è un circuito a costanti distribuite.

In un altro aspetto, la presente invenzione riguarda un sistema di trasmissione ad impulsi, comprendente almeno una stazione di trasmissione, una stazione di ricezione, una linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione ed almeno un amplificatore ottico serialmente collegato lungo detta linea a fibra ottica, caratterizzato dal fatto che detta stazione di trasmissione comprende una unità di generazione di segnali che comprende:

- un primo modulatore ottico di segnale, atto a modulare un segnale ottico con una serie di impulsi recanti una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata;
 - un secondo modulatore ottico di impulsi, otticamente collegato a detto primo modulatore ottico di segnale, atto a modulare un segnale ottico con una prima sequenza di impulsi periodici di durata prefissata, con una frequenza di ripetizione prefissata;
 - un generatore di un segnale ottico continuo, otticamente collegato a detti primo e secondo modulatore ottico, a lunghezza d'onda prefissata;
 - mezzi di pilotaggio di detto modulatore ottico di impulsi, comprendenti un elemento combinatore di un primo segnale elettrico periodico a detta frequenza prefissata e di almeno un secondo segnale elettrico periodico a una seconda frequenza che è una armonica di detta frequenza prefissata.
- 15 In particolare, detta linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione ha dispersione cromatica complessiva maggiore di zero alla lunghezza d'onda di detto segnale ottico. Preferibilmente, detta linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione comprende mezzi di
- 20 compensazione della dispersione cromatica atti a compensare una frazione della dispersione cromatica della linea, tali che la dispersione cromatica totale della linea è compresa tra il 100 ed il 120% della dispersione compensata. In una forma particolare di realizzazione, detta stazione di trasmissione comprende
- più unità di generazione di segnali, ciascuna delle quali comprendente un rispettivo generatore di un segnale ottico continuo ad una rispettiva lunghezza d'onda, differente da quella delle altre unità, atte ciascuna a generare un relativo segnale ottico ad impulsi ad una lunghezza d'onda; e
 - mezzi di moltiplicazione di detti segnali ottici ad impulsi.

Preferibilmente, detta stazione di ricezione comprende mezzi di demultiplazione in lunghezza d'onda di detti segnali ottici ad impulsi.

In un altro aspetto, la presente invenzione riguarda un sistema di trasmissione ad impulsi, comprendente almeno una stazione di trasmissione, una stazione
5 di ricezione, una linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione ed almeno un amplificatore ottico serialmente collegato lungo detta linea a fibra ottica, caratterizzato dal fatto che detta stazione di trasmissione comprende una unità di generazione di segnali che comprende:

- 10 – un primo modulatore ottico di segnale, atto a modulare un segnale ottico con una serie di impulsi recanti una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata;
- un secondo modulatore ottico di impulsi, otticamente collegato a detto primo modulatore ottico di segnale, atto a modulare un segnale ottico
15 con una prima sequenza di impulsi periodici di durata prefissata T_{FWHM} , con detta frequenza di ripetizione prefissata;
- un generatore di un segnale ottico continuo, otticamente collegato a detti primo e secondo modulatore ottico, a lunghezza d'onda prefissata;
- in cui il rapporto T_{bit}/T_{FWHM} , tra l'inverso di detta frequenza di ripetizione
20 prefissata T_{bit} e detta durata prefissata T_{FWHM} degli impulsi, è compreso tra 6 e 10.

Secondo un altro aspetto, la presente invenzione, riguarda un sistema di trasmissione ad impulsi, comprendente almeno una stazione di trasmissione, una stazione di ricezione, una linea a fibra ottica collegante detta stazione di
25 trasmissione e detta stazione di ricezione ed almeno un amplificatore ottico serialmente collegato lungo detta linea a fibra ottica, caratterizzato dal fatto che comprende:

- 30 – una stazione di trasmissione di almeno due segnali ottici esterni, aventi rispettivi primi parametri spettrali e recanti ciascuno una informazione secondo una prima codifica digitale;

- 5 – una rispettiva unità di interfacciamento in corrispondenza a ciascuno di detti segnali ottici esterni, comprendente una unità di ricezione di detti segnali ottici esterni ed una unità di emissione di corrispondenti segnali ottici di lavoro a lunghezze d'onda prefissate, digitalmente codificati con l'informazione di detti segnali ottici esterni, in forma di impulsi RZ;
- 10 – un primo elemento conduttore ottico, avente una prima dispersione cromatica alle lunghezze d'onda di detti segnali di lavoro;
- un secondo elemento conduttore ottico, avente una seconda dispersione cromatica alle lunghezze d'onda di detti segnali di lavoro, di segno opposto a detta prima dispersione cromatica, serialmente collegato a detto primo elemento conduttore ottico;
- 15 – detta prima dispersione cromatica e detta seconda dispersione cromatica essendo di valori prefissati, tali che la dispersione cromatica complessiva è maggiore di zero alle lunghezze d'onda di detti segnali di lavoro.

In particolare, detti segnali di lavoro ad impulsi possiedono, per almeno una porzione del loro cammino di propagazione in uno di detti primo e secondo elemento conduttore ottico, una intensità di valore tale da causare una automodulazione di fase di detti segnali di lavoro.

- 20 Preferibilmente, detto amplificatore ottico possiede potenza di uscita per ciascun canale di valore tale da determinare, in una porzione di uno di detti primo e secondo elemento conduttore ottico, una intensità di valore tale da causare una automodulazione di fase di detti segnali di lavoro.

- 25 In una forma preferita di realizzazione, detto primo elemento conduttore ottico è una fibra ottica a salto di indice; in alternativa, detto primo elemento conduttore ottico è una fibra ottica a dispersione non-zero.

Secondo un ulteriore aspetto, la presente invenzione riguarda un metodo di trasmissione ottica ad alta velocità, comprendente le fasi di:

- 30 – generare un segnale ottico;
- modulare detto segnale ottico con un primo segnale periodico ad una

frequenza di prefissata;

- modulare detto segnale ottico con un secondo segnale, recante una informazione codificata a detta frequenza di prefissata;
- in cui detta fase di modulare detto segnale ottico con un primo segnale periodico ad una frequenza di prefissata comprende applicare ad un modulatore ottico un segnale di pilotaggio comprendente detto segnale periodico a detta frequenza di prefissata ed almeno una armonica di detta frequenza di prefissata.

Secondo un ulteriore aspetto, la presente invenzione riguarda un metodo di trasmissione ottica ad alta velocità, comprendente le fasi di:

- ricevere un primo segnale ottico modulato, recante una informazione;
- convertire detto segnale ottico in un segnale elettrico recante detta informazione;
- modulare un secondo segnale ottico con una sequenza di impulsi, di prefissata durata temporale;
- modulare detto secondo segnale ottico con detto segnale elettrico recante detta informazione;
- alimentare detto secondo segnale ottico modulato con detta sequenza di impulsi e detto segnale elettrico in una linea ottica di trasmissione.

Maggiori dettagli potranno essere rilevati dalla seguente descrizione, con riferimento alle figure allegate, in cui si mostra:

In figura 1 uno schema generale di un dispositivo generatore secondo la presente invenzione;

in figura 2 uno schema di un dispositivo generatore secondo la presente invenzione, come realizzato a scopo sperimentale;

nelle figure 3a, 3b, 3c rispettivamente i grafici temporali (in unità arbitrarie) dell'ampiezza degli impulsi ottici ottenuti in presenza di una frequenza principale e della sua prima armonica, in differenti condizioni di sfasamento e di rapporto di ampiezze;

in figura 4 un esempio di un filtro combinatore per alte frequenze come

realizzato per il dispositivo di figura 2;

in figura 5a il grafico temporale degli impulsi in uscita dal primo modulatore del dispositivo di figura 2, in presenza della sola frequenza fondamentale;

5 in figura 5b il grafico temporale degli impulsi in uscita dal primo modulatore del dispositivo di figura 2, in presenza della frequenza fondamentale e della sua prima armonica;

in figura 6 il diagramma ad occhio in uscita dal dispositivo di figura 2, in presenza della frequenza fondamentale e della sua prima armonica, dopo la seconda modulazione;

10 in figura 7 uno schema generale di un sistema di trasmissione ad alta velocità secondo la presente invenzione;

in figura 8 un dispositivo di compensazione della dispersione, atto all'impiego nel sistema di trasmissione ad alta velocità;

15 in figura 9 uno schema di un dispositivo di trasformazione di segnali secondo la presente invenzione;

in figura 10 uno schema esemplificativo di un circuito PLL adatto come circuito di sincronizzazione.

Apparato di generazione di impulsi.

20 Come si mostra in Fig. 1, un laser 1, ad emissione continua, è collegato da un primo modulatore di ampiezza 2, detto nel seguito modulatore di impulsi ad esempio del tipo ad interferometro di Mach-Zehnder, pilotato da un segnale elettrico composito 3, costituito primo segnale elettrico periodico 4, preferibilmente sinusoidale, con frequenza f_1 pari alla frequenza di trasmissione desiderata (ad esempio 10 GHz), da un secondo segnale

25 elettrico periodico 5, anch'esso preferibilmente sinusoidale, a frequenza costituita dalla seconda armonica f_2 del segnale 3 (ad esempio 20 GHz) e, eventualmente, da uno o più segnali elettrici periodici 6, anch'essi preferibilmente sinusoidali, a frequenze costituite da armoniche superiori f_3, f_4, \dots (30, 40, ... GHz) della frequenza di trasmissione f_1 .

30 Ai fini della presente descrizione, per seconda armonica di un segnale di

frequenza data si intende un segnale a frequenza doppia di detta frequenza data, detta frequenza fondamentale; per terza armonica, quarta armonica, etc. si intendono segnali a frequenze rispettivamente tripla, quadrupla etc. di detta data frequenza fondamentale.

5 Ai fini della presente invenzione, per frequenza di un segnale periodico si intende la frequenza della sinusoide, nel caso che il segnale periodico sia un segnale sinusoidale, ovvero la frequenza della sinusoide fondamentale nello sviluppo in serie di Fourier del segnale, nel caso che esso abbia un profilo temporale non sinusoidale, e per armoniche superiori si intende frequenze multiple intere di detta della sinusoide o detta frequenza fondamentale.

10 Nel seguito, ove non diversamente specificato, si usano i termini "segnale sinusoidale" e "armonica della frequenza del segnale sinusoidale" intendendo che essi comprendono sia i segnali con profilo temporale sinusoidale e relative armoniche, sia segnali con profilo temporale differente, ad esempio
15 ad onda triangolare, quadrata o simili, ovvero con profili più complessi, ad esempio con un profilo a $\text{sech}^2(t)$ (tipico di impulsi solitonici), e segnali a frequenze armoniche della frequenza fondamentale di detti segnali, aventi lo stesso o un differente profilo temporale.

20 Segnali elettrici con profilo sinusoidale sono preferiti e possono convenientemente essere generati con dispositivi elettronici noti, come descritto nel seguito.

Tali segnali elettrici a diverse frequenze vengono combinati insieme tramite un filtro combinatore 7 (descritto nel seguito) dopo una eventuale amplificazione mediante rispettivi amplificatori 8, 9, 10.

25 Gli amplificatori 8, 9, 10 sono convenientemente amplificatori a banda stretta (uno per ogni armonica), che risultano molto semplici da realizzare e poco costosi (rispetto a amplificatori a banda larga che sarebbero necessari per amplificare un segnale a multifrequenza come quello all'uscita del filtro combinatore 7); ciò è possibile nel caso in cui l'amplificazione sia eseguita
30 prima del filtro combinatore.

Il modulatore di impulsi 2 riceve inoltre, convenientemente, un segnale elettrico di polarizzazione generato da un circuito di polarizzazione 11.

Il modulatore di impulsi 2 emette un segnale ottico modulato ad impulsi, che viene alimentato ad un secondo modulatore di ampiezza 12 (anch'esso ad esempio del tipo ad interferometro di Mach-Zehnder), detto nel seguito
5 modulatore di segnale, pilotato da un segnale elettrico 13 contenente i dati da trasmettere, eventualmente amplificato da un amplificatore a larga banda 14.

Il modulatore di segnale 11 riceve inoltre, convenientemente, un segnale elettrico di polarizzazione generato da un circuito di polarizzazione 15.

10 E' possibile anche scambiare l'ordine dei modulatori 2 e 12, mettendo il modulatore di segnale, modulato con i dati 12, prima del modulatore di impulsi 2, modulato con le sinusoidi 4, 5, 6.

E' possibile anche integrare i due modulatori 2 e 12, rispettivamente di impulsi e di segnale, ad esempio su uno stesso "chip" di LiNbO_3 , ottenendo un
15 vantaggio in termini di potenza di uscita del dispositivo.

In alternativa inoltre, come illustrato con linee tratteggiate in figura 1, è possibile anche interporre uno stadio di amplificazione ottica 16 tra i due modulatori, nel caso che le perdite ottiche dell'insieme fossero troppo elevate.

Il modulatore 2 può, ove conveniente, adottare una struttura ad elettrodo
20 risonante (a banda stretta).

Sebbene sia stato descritto l'impiego di modulatori ad interferometro di Mach-Zehnder, preferibilmente in LiNbO_3 , è possibile applicare la presente invenzione a diversi tipi di mezzi modulanti, ad esempio, oltre ai modulatori in LiNbO_3 , anche i modulatori a elettroassorbimento, in fibra sottoposta a
25 "poling", in polimeri o cristalli ottici organici, e simili dispositivi, atti ad applicare una modulazione in ampiezza ad un segnale ottico pilotati da un segnale prefissato in ingresso.

I segnali 4, 5, 6 hanno una prefissata relazione di fase e di ampiezza tra di loro.

30 In particolare, nel caso di due frequenze, rispettivamente indicate con f_0 e con

$2f_0$ (armonica superiore), la frequenza risultante è data da:

$$f_1 = A_1 \sin(2\pi f_0) + A_2 \sin(4\pi f_0 + \alpha);$$

in cui A_1 e A_2 sono le rispettive ampiezze delle due frequenze f_0 e $2f_0$ utilizzate e α è la differenza di fase relativa.

5 In tale condizione, nell'ipotesi di una risposta in frequenza ideale di un modulatore elettro-ottico, come mostrano le figure 3a, 3b, 3c, rispettivamente rappresentanti il treno di impulsi all'uscita del modulatore per tre differenti relazioni di fase (corrispondenti a valori di α pari a 0 (fig. 3a), $\pi/4$ (fig. 3b), $\pi/2$ (fig. 3c)), impulsi di larghezza via via minore sono ottenibili aumentando il
10 rapporto A_2/A_1 , come indicato dalle curve corrispondenti 16, 17, 18, 19, 20 rispettivamente relative a $A_2/A_1 = 0$ (assenza di seconda armonica); $A_2/A_1 = 0,25$; $A_2/A_1 = 0,5$; $A_2/A_1 = 0,75$; $A_2/A_1 = 1$.

Un limite all'aumento del rapporto A_2/A_1 è costituito dalla crescita di un picco secondario 21, a frequenza doppia della frequenza fondamentale applicata;
15 ad esempio, nelle condizioni adottate, si è osservato che tale picco è di ampiezza trascurabile per un rapporto A_2/A_1 compreso tra 0,25 e 0,5, (curve 17, 18) con cui si ottiene una ampiezza degli impulsi già soddisfacentemente ridotta rispetto alla presenza della sola frequenza fondamentale.

Si noti che detto picco secondario, se di valore troppo elevato, potrebbe essere rilevato come un valore 1 nella trasmissione digitale, anche se il
20 corrispondente picco principale è stato cancellato a seguito della modulazione imposta.

In generale, in un sistema reale, la relazione tra le ampiezze e la fase è influenzata dalle caratteristiche di risposta dei modulatori impiegati e deve
25 essere definita di volta in volta, operativamente, a seconda della durata dell'impulso che si vuole ottenere all'uscita del dispositivo e del rumore sui valori di zero in ricezione, ad esempio controllando il tasso di errore (Bit Error Rate, o BER) alla ricezione in funzione dei suddetti parametri (relazione tra le ampiezze e fase), in modo che sia al di sotto del valore desiderato (per
30 esempio almeno inferiore a 10^{-9}).

La sincronizzazione della fase di tutti i segnali può essere ottenuta con regolatori di fase a microonde, ad esempio come descritto nel seguito.

Il treno regolare di impulsi alla frequenza fondamentale generato dal modulatore 2 è alimentato al secondo modulatore 12. Tale modulatore, pilotato da un segnale elettrico contenente l'informazione da trasmettere, codifica l'informazione sul treno di impulsi (sistema ottico digitale a modulazione esterna).

La caratteristica di trasferimento non lineare del modulatore 2, in risposta ai segnali sinusoidali a frequenze diverse ad esso alimentati, fa sì che all'uscita del sistema si ottenga un treno continuo di impulsi di tipo RZ, sostanzialmente non affetti da "chirp", adatti alla trasmissione in regime di SPM almeno in una parte della linea.

In un esperimento è stato utilizzato l'apparato rappresentato in Fig. 2, in cui i componenti corrispondenti sono designati con gli stessi riferimenti numerici di figura 1.

Si è utilizzato come laser in continua 1 un laser DFB con potenza di uscita di 10 mW e lunghezza d'onda di 1549 nm. Il modulatore di impulsi 2 è stato modulato con un segnale composito 3a, comprendente la frequenza fondamentale 4a di 5 GHz, che è stata ricavata dal clock del sistema e opportunamente amplificata con un amplificatore a microonde, e la sua seconda armonica 5a a 10 GHz, ottenuta moltiplicando per due la frequenza del clock, anch'essa amplificata.

La combinazione delle due frequenze 4a, 5a, ottenuta per mezzo del filtro combinatore 7, è stata quindi inviata al modulatore di impulsi 2.

Il segnale ottico che è stato ottenuto all'uscita del modulatore di impulsi 2 (ottenuto con un oscilloscopio a campionamento) è riportato nelle figure. 5a, 5b, rispettivamente nel caso in cui è stata alimentata la sola frequenza 5 GHz e in presenza delle due frequenze a 5 e a 10 GHz combinate.

Ai fini della presente descrizione si intende come "durata" di un impulso la sua durata totale a 1/2 altezza, nota nell'arte come T_{FWHM} (Full Width Half

Maximum).

Come si rileva dalla figura 5b, la durata misurata degli impulsi risultanti in presenza delle due frequenze a 5 e a 10 GHz combinate è stata di circa 50 ps; agendo opportunamente sul controllo della polarizzazione (bias) del
5 modulatore 2 e sulle ampiezze e sulle fasi relative dei due segnali a 5 e a 10 GHz è stato inoltre possibile variare la durata degli impulsi nel campo 50-100 ps.

Tale regolazione, inoltre, ha consentito inoltre di ottimizzare il profilo temporale degli impulsi, rendendolo quanto più possibile simmetrico (cioè con
10 ugual pendenza per il fronte di salita e per il fronte di discesa dell'impulso).

Con la sola frequenza 5 GHz, invece, è stato possibile ottenere un treno di impulsi con durata minima di non inferiore a 75 ps, che risulta molto più elevata della precedente.

L'uso delle due frequenze armoniche combinate in ingresso al modulatore
15 consente quindi la sostanziale eliminazione della restrizione del campo dei valori ottenibili, nell'ambito di valori di durata che risulta più interessante per i casi pratici.

È infatti utile, nelle trasmissioni di tipo RZ, utilizzare durate di impulso abbastanza brevi rispetto al periodo di ripetizione (in questo caso 200 ps).

20 Impulsi di eccessiva durata (ad esempio 75 ps o più), infatti, risulterebbero troppo vicini temporalmente e potrebbero interagire tra loro nella propagazione lungo la linea, dando luogo a distorsione di segnale, a seguito degli effetti non lineari associati alla loro propagazione nella fibra.

La durata per la quale due impulsi consecutivi tendono a collidere, dopo una
25 certa distanza percorsa in fibra dipende dal tempo intercorrente tra gli impulsi stessi, cioè dalla frequenza di trasmissione (o Bit rate), come ad esempio descritto da Govind P. Agrawal, in "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, 2ª edizione, 1995, pagg. 170-172.

Tipicamente, per percorrenze in fibra dell'ordine del migliaio di chilometri, un
30 rapporto T_{bit}/T_{FWHM} maggiore di 6 e preferibilmente maggiore di 8 è ritenuto

accettabile. Preferibilmente tale rapporto è inferiore a 10.

Per T_{bh} si intende l'inverso della frequenza di trasmissione, o "Bit rate", adottata.

5 Il grado di libertà in più reso possibile dall'introduzione della seconda frequenza rende il trasmettitore con le due frequenze estremamente più versatile di quello a frequenza singola, e quindi adattabile alle esigenze di tutti i sistemi di utilizzo pratico.

L'introduzione di ulteriori frequenze armoniche, ove conveniente, consente inoltre di adattare il sistema a particolari specifiche esigenze.

10 Le durate degli impulsi riportate in precedenza sono le durate reali degli impulsi, ottenute deconvolvendo dalle misure gli effetti di banda dello strumento.

Gli impulsi ottici generati dal modulatore di impulsi 2 sono quindi stati inviati al secondo modulatore 12, o modulatore di segnale, passando attraverso
15 l'amplificatore ottico 16, in modo da compensare le perdite introdotte dal modulatore di impulsi.

Quindi, il modulatore di segnale 12 introduce la codifica dei dati a 5 Gbit/s, dando origine al segnale, rappresentato in Fig. 6.

20 Convenientemente la lunghezza dei conduttori elettrici di collegamento tra gli apparati elettronici e i modulatori è dimensionata in modo da sincronizzare il treno di impulsi generato dal primo modulatore con il segnale elettronico dei dati che alimenta il secondo modulatore.

Convenientemente la sincronizzazione di tutti i segnali può essere ottenuta con regolatori di fase a microonde.

25 Filtro combinatore.

Il filtro combinatore 7, rappresentato in Fig. 4, è costituito da un circuito a microstriscia o a costanti distribuite, costituito da un substrato 21a in materiale isolante, preferibilmente ceramico, sul quale sono ricavati più percorsi conduttivi o strisce 22, 23, 24.

30 La striscia 22 presenta due estremi, 25, 26, rispettivamente collegati ad un

conduttore di ingresso 25a, recante un segnale in ingresso alla frequenza principale (5 GHz nell'esempio) e ad un conduttore di uscita 26a, recante il segnale composito di uscita costituito dalla frequenza principale e dalla sua seconda armonica. Il segnale alla frequenza della seconda armonica della
5 frequenza principale (10 GHz nell'esempio) è alimentato da un secondo conduttore di ingresso 27a collegato alla striscia 24.

Come mostra la figura, le strisce 22, 23, 24 hanno porzioni aventi rispettive lunghezze l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 , che sono funzioni della lunghezza d'onda dei segnali; in particolare, nell'esempio illustrato, l_1, l_2, l_3, l_4 , sono uguali e pari a $\lambda/4$ e l_5 è
10 pari a $\lambda/2$, dove λ è la lunghezza d'onda del segnale a 10 GHz.

In particolare, sul ramo 24, di ingresso a 10 GHz, è stato messo un filtro centrato a 10 GHz (costituito dalla porzione 28 della striscia 24, dalla striscia 23 e dalla porzione 29 della striscia 22, aventi rispettivamente lunghezze $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$), in modo da impedire il passaggio della frequenza a 5 GHz verso
15 l'ingresso 27a a 10 GHz.

Inoltre, verso l'ingresso a 5 GHz, la frequenza 10 GHz vede un circuito aperto (costituito da tre tratti 29, 30, 31 di lunghezza $\lambda/4$). Quindi la frequenza 10 GHz viene convogliata tutta verso l'uscita 26. Sul ramo di ingresso a 5 GHz 25 è stato ottenuto l'adattamento verso l'uscita (tramite un filtro che non lascia
20 passare la frequenza 5 GHz e tramite i tre tratti 29, 30, 31 di lunghezza $\lambda/4$): pertanto anche la frequenza 5 GHz viene convogliata tutta verso l'uscita 26.

La perdita introdotta dal dispositivo è stata rilevata pari a circa 0.5 dB per ciascuna frequenza.

Il segnale così ottenuto viene mandato al modulatore 2.

25 La Richiedente ha osservato che, mentre se per la combinazione delle frequenze si utilizza un accoppiatore a microonde vengono persi almeno 6 dB, l'utilizzo di un dispositivo (come il filtro combinatore descritto in Fig. 4 a titolo di esempio), consente di combinare due o più frequenze diverse con perdite trascurabili per ciascuna frequenza, dando origine ad una
30 combinazione con perdite idealmente nulle (a parte le perdite in eccesso, che

si possono valutare dell'ordine di 0.5 dB per ogni frequenza).

Inoltre, secondo la presente invenzione, grazie all'assenza sostanziale di perdite nell'operazione di combinazione, si può amplificare separatamente ogni frequenza prima del combinatore, utilizzando quindi amplificatori a banda stretta, facili da realizzare e poco costosi.

Sistema di trasmissione

Come mostra la figura 7, un sistema di telecomunicazione ottica ad alta velocità, a moltiplicazione di lunghezza d'onda, secondo un esempio di realizzazione della presente invenzione riceve più segnali ottici di origine, 30a, 30b, 30c, 30d, 30e, 30f etc. (ad esempio 16), ciascuno dei quali segnali, detti "segnali esterni", possiede sue proprie caratteristiche di trasmissione, in particolare lunghezza d'onda, potenza, tipo di modulazione e frequenza di trasmissione (Bit rate), ad esempio a 10 Gbit/s.

I segnali, generati da sorgenti esterne locali o provenienti da ulteriori porzioni di rete ottica, sono alimentati ciascuno ad una rispettiva unità di interfacciamento 32a, 32b, 32c, 32d, 32e, 32f, etc., atta a ricevere i segnali ottici esterni di origine, a rivelarli ed a riprodurli nuovamente con caratteristiche adatte al sistema di trasmissione ad alta velocità.

In particolare, dette unità di interfacciamento generano rispettivi segnali ottici di lavoro aventi lunghezze d'onda λ_1 , λ_2 , λ_3 , λ_4 , λ_5 , λ_6 , e così via, comprese nella banda di lavoro utile degli amplificatori disposti successivamente nel sistema, aventi, in aggiunta, caratteristiche di modulazione ad impulsi RZ.

Nel brevetto US 5267073, della stessa Richiedente, la cui descrizione è incorporata per riferimento, sono descritte unità di interfacciamento comprendenti in particolare un adattatore di trasmissione, atto a convertire un segnale ottico in ingresso in forma adatta alla linea di trasmissione ottica, ed un adattatore di ricezione, atto a riconvertire il segnale trasmesso in forma adatta ad una unità di ricezione.

Nel caso che i segnali dei vari canali da trasmettere siano segnali di tipo elettrico e non ottico, questi sono direttamente alimentati ciascuno ad una

rispettiva unità di trasmissione, alla relativa lunghezza d'onda, incorporante l'apparato di generazione di impulsi in precedenza descritto.

I segnali ottici di lavoro generati dalle unità di interfacciamento 32 o direttamente generati alle lunghezze d'onda previste, sono quindi alimentati
5 ad un combinatore di segnale 33, atto ad inviare in una unica fibra ottica di uscita 34 contemporaneamente i segnali di lavoro alle lunghezze d'onda λ_1 , λ_2 , λ_3 , λ_4 , λ_5 , λ_6 , etc..

In generale, il combinatore di segnale 33 è un dispositivo ottico passivo, mediante il quale i segnali ottici trasmessi su rispettive fibre ottiche sono
10 sovrapposti in una unica fibra; dispositivi di tal genere sono ad esempio costituiti da accoppiatori a fibre fuse, in ottica planare, microottica e simili.

A titolo di esempio, combinatori di tale genere sono posti in commercio da E-TEK DYNAMICS INC., 1885 Lundy Ave., San Jose, CA (USA).

Attraverso la fibra 34 i detti segnali di lavoro sono inviati ad un amplificatore di
15 potenza 35, che ne eleva il livello fino ad un valore sufficiente a percorrere un successivo tratto di fibra ottica intercorrente prima di nuovi mezzi di amplificazione mantenendo al termine un sufficiente livello di potenza per garantire la qualità trasmissiva richiesta.

All'amplificatore di potenza 35 è quindi collegato un primo tratto 36a di linea
20 ottica, preferibilmente costituito da una fibra ottica monomodale, inserita in un adatto cavo ottico; tipicamente, per le caratteristiche della trasmissione del sistema secondo la presente invenzione, la linea ha lunghezza dell'ordine di circa 100 chilometri (ad esempio 80-120 chilometri con i livelli di potenza di seguito indicati ed i dispositivi di compensazione della dispersione descritti).

Al termine di detto primo tratto 36a di linea ottica è presente un primo
25 amplificatore di linea 37a, atto a ricevere i segnali, attenuati nel percorso in fibra, e ad amplificarli fino ad un livello sufficiente ad alimentarli ad un secondo tratto di linea a fibra ottica 36b, di caratteristiche analoghe a quelle della precedente.

30 Successivi amplificatori di linea 37b, 37c, 37d e così via, e rispettivi tratti di

fibra ottica 36c, 36d, 36e, 36f, 36g e così via coprono la distanza di trasmissione complessiva richiesta, fino a pervenire ad una stazione di ricezione 38, che comprende un preamplificatore 39, atto a ricevere i segnali e ad amplificarli, compensando la perdita data dalle successive apparecchiature di demultiplazione, fino ad un livello di potenza adeguato alla sensibilità dei dispositivi di ricezione.

Tipicamente, in una forma preferita di realizzazione del presente sistema, la distanza complessiva del collegamento compresa tra una stazione di trasmissione, alloggiante le unità di interfacciamento, e la stazione di ricezione, può essere dell'ordine di circa 1000-2000 chilometri, preferibilmente intorno a 1000 chilometri (considerati i margini di sicurezza richiesti).

In una forma preferita di realizzazione, le fibre ottiche monomodali impiegate nei vari tratti 36 sopra descritti sono di tipo a salto di indice, con le quali si è ottenuta una soddisfacente trasmissione a 10 Gbit/s sulla suddetta distanza di circa 1000-2000 chilometri.

Sebbene le fibre a salto d'indice siano preferite ai fini della presente invenzione, in relazione a specifiche esigenze, come ad esempio per sistemi con maggiori distanze, o di più alti valori di frequenza di cifra (ad esempio 40 Gbit/s), è possibile l'impiego di fibre con più basso valore di dispersione cromatica, ad esempio fibre a dispersione non zero (Non Zero Dispersion), descritte nella Raccomandazione ITU-T G655 1997, oppure anche di tipo a dispersione spostata (Dispersion Shifted), descritte nella già citata Raccomandazione ITU-T G653 1993 (ad esempio nel caso in cui i fenomeni di Four Wave Mixing non risultino critici), ovvero combinazioni di fibre con differenti valori di dispersione, purché nel complesso sia consentita la propagazione degli impulsi solitonici o simil-solitonici.

Dal preamplificatore 39 i segnali sono inviati ad un demultiplatore 40, attraverso cui i segnali stessi sono separati in dipendenza dalle relative lunghezze d'onda, e quindi inviati a rispettive unità di ricezione o di interfacciamento 41a, 41b, 41c, 41d, 41e, 41f etc., atte a ricevere i segnali

ottici e ad utilizzarli come tali, ovvero, se richiesto, a rigenerarli con le caratteristiche ottiche adatte alle apparecchiature successivamente previste (non rappresentate).

5 Il demultiplatore 40 può essere realizzato con molteplici tecnologie, ad esempio impiegando divisori di segnale in associazione con filtri a reticolo di Bragg, filtri interferenziali o loro combinazioni, ovvero dispositivi a reticoli a schiera (Arrayed Waveguide Gratings, o AWG), o simili.

10 La configurazione descritta si presta in modo particolarmente soddisfacente a trasmissioni su distanze dell'ordine di circa 1000 km, con velocità di trasmissione elevata, ad esempio 10 Gbit/s (realizzando con sedici canali a diverse lunghezze d'onda multiplate una capacità di trasmissione complessiva di 160 Gbit/s).

15 Ai fini della presente invenzione e per l'impiego sopra descritto, l'amplificatore di potenza 35 è, preferibilmente, un amplificatore ottico a fibra drogata con erbio, ad uno o più stadi; nel sistema esemplificato, in presenza di 16 canali multiplati in lunghezza d'onda, l'amplificatore di potenza 35 ha, tipicamente, le seguenti caratteristiche:

potenza di ingresso da -5 a +2 dBm

potenza di uscita +20 dBm

20 lunghezza d'onda di lavoro 1530-1560 nm.

Amplificatori di tale genere sono ad esempio posti in commercio dalla Richiedente.

25 Per amplificatore di potenza si intende un amplificatore funzionante in condizioni di saturazione, in cui la potenza in uscita dipende dalla potenza di pompaggio, come descritto in dettaglio nel brevetto europeo N° EP 439.867, qui incorporato per riferimento.

30 Ai fini della presente invenzione e per l'impiego sopra descritto, il preamplificatore 39 è, preferibilmente, un amplificatore ottico a fibra drogata con erbio, ad uno o più stadi; nel sistema esemplificato, in presenza di 16 canali multiplati in lunghezza d'onda, il preamplificatore 39 ha, tipicamente, le

seguenti caratteristiche:

potenza di ingresso da -5 a +2 dBm

potenza di uscita da +7 a +10 dBm

lunghezza d'onda di lavoro 1530-1560 nm.

- 5 Ai fini della presente invenzione e per l'impiego sopra descritto, per preamplificatore si intende un amplificatore posto all'estremo della linea, in grado di elevare il segnale da alimentare al ricevitore ad un valore opportunamente superiore alla soglia di sensibilità del ricevitore stesso (per esempio da -26 a -11 dBm in ingresso al ricevitore), nel contempo
- 10 introducendo il minimo rumore possibile e mantenendo l'equalizzazione dei segnali.

Preamplificatori adatti sono posti in commercio dalla Richiedente.

- Gli amplificatore di linea sono, preferibilmente, amplificatori ottici a fibra drogata con erbio, preferibilmente a più stadi, atti a fornire in uscita una
- 15 potenza complessiva di almeno 20 dBm e ad operare con una lunghezza d'onda di lavoro di 1530-1560 nm.

- Convenientemente, almeno uno degli amplificatori di linea 37 e/o il preamplificatore 39 sono associati ad una rispettiva unità di compensazione della dispersione cromatica 42, atta a compensare almeno una parte della
- 20 dispersione cromatica della linea o di un tratto di linea ad essa relativo.

Preferibilmente, tutti gli amplificatori di linea 37 ed il preamplificatore 39 sono associati a unità di compensazione della dispersione cromatica 42.

- In alternativa, è possibile inserire unità di compensazione della dispersione cromatica ogni 200-500 chilometri (ad esempio ogni 2 amplificatori o più), o
- 25 anche inserire una o più unità di compensazione della dispersione all'inizio o alla fine dell'intero collegamento.

- Tale scelta è legata, tra altri fattori, alla lunghezza complessiva della linea: ad esempio, per una linea della lunghezza complessiva intorno a 1000 chilometri è possibile predisporre una unità di compensazione ogni 100-200 chilometri
- 30 circa, mentre per linee di minor lunghezza complessiva, ad esempio 300-400

chilometri circa, può essere predisposta una sola unità di compensazione.

Un esempio di realizzazione di un sistema di trasmissione secondo l'invenzione, su una distanza di circa 1000 km, comprendente 10 tratte di fibra ottica a salto d'indice SI da circa 100 chilometri ciascuna, ammette una dispersione cromatica complessiva massima di circa 18000 ps/nm ed una dispersione cromatica complessiva minima di circa 15500 ps/nm (dipendente sostanzialmente dalle caratteristiche delle fibre SI impiegate), di cui almeno 15500 ps/nm è compensata dalle unità di compensazione della dispersione cromatica 42.

Preferibilmente, in presenza di un totale di 10 tra amplificatori di linea 37 e preamplificatore 39, ciascuna di dette unità di compensazione della dispersione cromatica 42 è prevista per compensare circa 1550 ps/nm.

Uno schema di un amplificatore di linea è rappresentato in figura 8 a titolo esemplificativo.

Tale amplificatore comprende un primo stadio 43 ed un secondo stadio 44, tra i quali è collocata l'unità di compensazione della dispersione cromatica 42.

Ciascuno degli stadi 43 e 44 comprende una fibra attiva drogata con erbio 45 e mezzi di pompaggio 46.

Uno o più isolatori ottici 47 sono inoltre presenti, preferibilmente all'ingresso ed all'uscita di ciascuno stadio.

Preferibilmente, almeno un tratto della fibra attiva 45 ed i mezzi di pompaggio 46 sono disposti in modo da alimentare una lunghezza d'onda di pompaggio alla fibra attiva in direzione equicorrente al segnale nel primo stadio e controcorrente al segnale nel secondo stadio.

In una forma preferita di realizzazione i mezzi di pompaggio comprendono almeno una sorgente di lunghezza d'onda di pompaggio (tipicamente un laser, nel caso che si desideri pompaggio spazialmente coerente, oppure, ad esempio, una schiera di diodi laser, nel caso che la fibra sia disegnata in modo da accettare tale tipo di pompaggio), associato a relativi mezzi di accoppiamento alla fibra attiva (ad esempio accoppiatori a fibre fuse o filtri

interferenziali, ovvero accoppiatori di tipo multimodale, in associazione con fibre a doppio cladding o simili).

Convenientemente, l'unità di compensazione della dispersione cromatica 42 è collocata all'interno dell'amplificatore, in posizione intermedia tra i due stadi, ottenendo in tal modo che l'attenuazione da essa apportata non penalizzi le prestazioni dell'amplificatore (in termini di rapporto segnale/rumore o di potenza di uscita).

In alternativa, nel caso che le caratteristiche del sistema lo consentano o lo consiglino, l'unità di compensazione della dispersione cromatica 42 può anche essere disposta a monte o a valle di un amplificatore, oppure ancora in posizione indipendente da esso.

L'unità di compensazione della dispersione cromatica 42 comprende, ad esempio, un tratto di prefissata lunghezza di fibra compensatrice di dispersione (cioè, ad esempio, una fibra avente dispersione cromatica fortemente negativa nella banda di lunghezze d'onda impiegate per la trasmissione, tale da compensare in tutto o in parte la dispersione positiva in tale banda delle fibre SI impiegate per la linea) come descritto ad esempio nel brevetto US 5361319, ovvero uno o più tratti di fibra recanti un grating "chirpato", (cioè avente passo del reticolo non costante) collegato nella linea mediante un circolatore, un accoppiatore o simili, in modo da riflettere in opportuna sequenza temporale le diverse componenti spettrali del segnale, ad esempio come descritto nel brevetto US 4239336, in modo da causare una modifica del profilo temporale dell'impulso opposta a quella causata dalla fibra della linea e di entità tale da compensarne almeno una parte.

Le caratteristiche tipiche di un sistema del tipo descritto sono riepilogate nella tabella 1 seguente.

TABELLA 1

Potenzialità di trasmissione	16 canali x 10 Gbit/s
Lunghezza di collegamento	~1000 km
Massima attenuazione ammessa	10x25 dB

Minima attenuazione ammessa	10x20 dB
Massima dispersione cromatica ammessa	18000 ps/nm
Minima dispersione cromatica ammessa	15500 ps/nm
Compensazione di dispersione cromatica	10x1550 ps/nm
Potenza di uscita da amplificatori di linea	~20 dBm
Numero di canali	8-16
Massima PMD ammessa	~0,5-1 ps/km ^{1/2}
Dispersione cromatica totale	100-120% della dispersione compensata

Uno schema di una unità di interfacciamento in trasmissione, secondo un esempio di realizzazione della presente invenzione, è illustrato in figura 9.

L'unità di interfacciamento comprende un fotorivelatore (fotodiodo) 51, atto a ricevere il segnale ottico 30, e ad emettere un segnale elettrico, che viene
5 alimentato ad un amplificatore elettronico 52.

L'amplificatore elettronico 52 possiede una linea di uscita, recante il segnale elettrico amplificato, collegata ad un nodo divisore di potenza 53, avente due rispettivi rami di uscita, il primo dei quali collegato ad un circuito di decisione 54, atto a generare un segnale elettrico 14 di pilotaggio di un modulatore di
10 segnale 12, collegato con un laser ad emissione continua 1, ed un secondo ramo di uscita collegato ad un secondo amplificatore elettronico 55 e da esso ad una unità di estrazione di clock 56, atta a generare un segnale temporale sincrono con l'informazione digitale in ingresso.

Unità di estrazione di clock sono poste in commercio, ad esempio, da
15 Veritech Microwave, Inc. (NJ, USA).

Un circuito di sincronizzazione 57, che riceve il segnale di clock generato da unità di estrazione di clock 56, genera un segnale di sincronizzazione 58, alimentato al circuito di decisione 54, e un segnale periodico 4, preferibilmente sinusoidale, alla frequenza di cifra del segnale ottico in
20 ingresso, come indicato con riferimento alle figure 1 e 2.

In una forma di realizzazione preferita il circuito di sincronizzazione 57 è un

circuito PLL (Phase Locked Loop), uno schema del quale è rappresentato, a scopo esemplificativo, in figura 10.

5 Il segnale a 10 GHz proveniente dal circuito di estrazione di clock 56 è alimentato ad un primo ingresso di un circuito miscelatore 101, che riceve inoltre un segnale elettrico generato da un oscillatore controllato in tensione 101, la cui frequenza di uscita (ad esempio a 100 MHz) è preferibilmente alimentata ad un moltiplicatore di frequenza 102 (che genera in uscita una frequenza di 10 GHz, moltiplicando per 100 l'ingresso) il cui segnale è inviato sia in uscita, sia ad un secondo ingresso del circuito miscelatore 101.

10 Il segnale di uscita dal circuito miscelatore 101, costituito da un segnale contenente la frequenza somma e la frequenza differenza delle frequenze in ingresso, è alimentato, attraverso un filtro passa basso 103, a controllare la frequenza di uscita dell'oscillatore controllato in tensione 101, mantenendo quindi quest'ultima agganciata alla frequenza del segnale del circuito di estrazione di clock 56.

15 Circuiti PLL adatti allo scopo sono noti nell'arte.

Sebbene circuiti di sincronizzazione di tipo PLL siano preferiti, possono essere anche impiegati filtri a risonatore dielettrico, come ad esempio il circuito che fa parte del dispositivo O/E Converter MP 9S042, posto in commercio da ANRITSU WILTRON S.p.A., Roma, costruito e venduto per l'impiego come unità di ricezione ottica, operante a 10 Gbit/s, ovvero equivalenti tecnologie.

20 I componenti dal fotodiodo 51 al circuito di sincronizzazione 57 ed al circuito di decisione 54 costituiscono, nel complesso, una unità di conversione ottico-elettrica 59; per realizzare la funzione di tale unità può essere anche impiegato il dispositivo O/E Converter MP 9S042 ANRITSU sopra citato (impiegante un filtro a risonatore dielettrico), o analoghi dispositivi componenti di unità di ricezione ottica.

25 Rispettivi circuiti regolatori di fase 58a, 60 sono inoltre previsti in uscita dal circuito di sincronizzazione 57 lungo le linee dei rispettivi segnali 58 e 4, allo

30

scopo di portare il segnale di sincronizzazione 58 ed il segnale sinusoidale 4 in prefissata relazione di fase tra loro (tenendo in conto le caratteristiche di risposta dei vari componenti del circuito e dei modulatori).

5 Il segnale sinusoidale 4 è quindi inviato, attraverso un ramo di un divisore di potenza 61, ad un primo amplificatore a banda stretta 8 e quindi all'ingresso alla frequenza fondamentale del filtro combinatorio 7; attraverso l'altro ramo del divisore di potenza 61, il segnale sinusoidale 4 è inoltre inviato ad un moltiplicatore di frequenza 62, atto a generare in uscita un segnale 5 a
10 frequenza multipla di quella in ingresso e in relazione di fase regolabile con essa, ad un secondo amplificatore a banda stretta 9, con potenza di uscita preferibilmente regolabile e da esso all'ingresso di seconda armonica del filtro combinatorio 7.

15 Il segnale 3 in uscita dal filtro combinatorio 7, costituito dalla combinazione dei segnali 4, 5 è quindi inviato al modulatore di impulso 2, collegato all'uscita del laser 1 in serie al modulatore di segnale 12.

Il moltiplicatore di frequenza 62 può convenientemente comprendere inoltre ulteriori uscite, a frequenze multiple della frequenza in ingresso (armoniche superiori), che possono a loro volta essere alimentate al filtro combinatorio 7.

20 L'uscita ottica 63 del modulatore 12 (ovvero del modulatore 2 se montati in ordine inverso), costituisce il segnale ad impulsi RZ di trasmissione, alla lunghezza d'onda tipica del laser 1.

Il circuito di interfacciamento comprende inoltre elementi di controllo di polarizzazione (bias) del circuito, non illustrati, circuiti di pilotaggio e controllo della lunghezza d'onda di emissione del laser 1, atti a mantenerla costante al
25 valore preselezionato, compensando eventuali perturbazioni esterne come temperatura, come pure i circuiti di controllo del punto di lavoro (bias) dei modulatori 2, 12 e simili, in base alle specifiche esigenze del sistema.

Nel caso che il segnale da trasmettere sia un segnale di tipo elettrico, alla
30 velocità di cifra prevista (per esempio a 10 Gbit/s), al posto dell'unità di interfacciamento sopra descritta viene usata una unità di trasmissione, avente

sostanzialmente la stessa struttura dell'unità di interfacciamento, ma priva del fotodiodo 51, in cui cioè il segnale elettrico in ingresso viene direttamente alimentato all'ingresso dell'amplificatore 52.

5 Nel caso inoltre che il profilo temporale del segnale elettrico recante l'informazione disponibile, sia esso direttamente generato in tale forma, oppure ricavato dal fotodiodo 51, risponda a sufficienti requisiti tali da portare ad un accettabile valore di tasso di errore, come sopra definito, è anche possibile alimentare il segnale elettrico stesso direttamente (o dopo amplificazione) in ingresso al modulatore 12 per costituirne il segnale di pilotaggio.

10 Nel caso inoltre che il suddetto segnale elettrico recante l'informazione sia generato in prossimità del trasmettitore ottico, ovvero che il relativo segnale di clock sia comunque disponibile da una fonte esterna (ad esempio la stessa apparecchiatura di generazione del segnale), è possibile alimentare tale
15 segnale di clock direttamente al circuito di sincronizzazione 57, o anche alla sua uscita.

Il sistema secondo l'invenzione consente quindi di ricevere segnali ottici aventi le caratteristiche tipiche delle unità di trasmissione a cui il sistema stesso è collegato, e di generare, in corrispondenza ad essi, segnali ad
20 impulsi RZ, sostanzialmente privi di chirp, di intensità e durata adatte a consentire la propagazione nella linea in assenza di interazioni tra impulsi e tra segnali a diversa lunghezza d'onda, in condizioni di auto-modulazione di fase (Self Phase Modulation) per un tratto della linea stessa, in cui l'intensità del segnale nel mezzo conduttore ottico (ad esempio la fibra ottica di linea)
25 supera un valore prefissato ed in condizioni sostanzialmente lineari, atte a consentire la compensazione della dispersione cromatica in essa originata, in un secondo tratto di linea.

RIVENDICAZIONI

1) Trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, caratterizzato dal fatto che comprende:

- 5 – un primo modulatore ottico di segnale;
- un secondo modulatore ottico di impulsi, otticamente collegato a detto primo modulatore ottico di segnale;
- un generatore di un segnale ottico continuo, otticamente collegato a detti primo e secondo modulatore ottico;
- 10 – mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale con un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata;
- mezzi di pilotaggio di detto secondo modulatore, comprendenti un elemento combinatorio di un primo segnale elettrico periodico a detta
- 15 frequenza prefissata e di almeno un secondo segnale elettrico periodico a una seconda frequenza che è una armonica di detta frequenza prefissata.

2) Trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di pilotaggio di detto secondo

20 modulatore comprendono un circuito di generazione di detto primo segnale elettrico periodico a detta frequenza prefissata, pilotato da un segnale di clock associato a detto segnale elettrico recante una informazione, ed un circuito di generazione di detto secondo segnale elettrico periodico a detta seconda frequenza, armonica di detta frequenza

25 prefissata.

3) Trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto circuito di generazione di detto secondo

30 segnale elettrico periodico a detta seconda frequenza, armonica di detta frequenza prefissata comprende un moltiplicatore di frequenza, collegato a detto circuito di generazione di detto primo segnale elettrico periodico.

- 4) Trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale con un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata sono essenzialmente costituiti da un circuito di alimentazione di un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata a detto primo modulatore ottico.
- 5) Trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale con un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata comprendono un circuito di generazione di detto segnale elettrico recante una informazione codificata, in risposta ad un segnale esterno.
- 6) Trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che detto circuito di generazione di detto primo segnale elettrico periodico a detta frequenza prefissata, pilotato da detto segnale di clock, comprende una uscita recante un segnale di sincronizzazione, in prefissata relazione temporale con detto segnale di clock, collegata a detti mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale.
- 7) Trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di pilotaggio di detto primo modulatore ottico di segnale con un segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata comprendono un circuito di decisione, ricevente detto segnale elettrico recante una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata e detto segnale di clock.
- 8) Trasmettitore di impulsi ottici ad alta velocità, secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detto elemento combinatorio è un circuito a costanti distribuite.

- 9) Sistema di trasmissione ad impulsi, comprendente almeno una stazione di trasmissione, una stazione di ricezione, una linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione ed almeno un amplificatore ottico serialmente collegato lungo detta linea a fibra ottica, caratterizzato dal fatto che detta stazione di trasmissione comprende una unità di generazione di segnali che comprende:
- un primo modulatore ottico di segnale, atto a modulare un segnale ottico con una serie di impulsi recanti una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata;
 - un secondo modulatore ottico di impulsi, otticamente collegato a detto primo modulatore ottico di segnale, atto a modulare un segnale ottico con una prima sequenza di impulsi periodici di durata prefissata, con una frequenza di ripetizione prefissata;
 - un generatore di un segnale ottico continuo, otticamente collegato a detti primo e secondo modulatore ottico, a lunghezza d'onda prefissata;
 - mezzi di pilotaggio di detto modulatore ottico di impulsi, comprendenti un elemento combinatorio di un primo segnale elettrico periodico a detta frequenza prefissata e di almeno un secondo segnale elettrico periodico a una seconda frequenza che è una armonica di detta frequenza prefissata.
- 10) Sistema di trasmissione ad impulsi, secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che detta linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione ha dispersione cromatica complessiva maggiore di zero alla lunghezza d'onda di detto segnale ottico.
- 11) Sistema di trasmissione ad impulsi, secondo la rivendicazione 10, caratterizzato dal fatto che detta linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione comprende mezzi di compensazione della dispersione cromatica atti a compensare una frazione della dispersione cromatica della linea, tali che la dispersione

cromatica totale della linea è compresa tra il 100 ed il 120% della dispersione compensata.

12) Sistema di trasmissione ad impulsi, secondo la rivendicazione 11, caratterizzato dal fatto che detta stazione di trasmissione comprende

- 5 – più unità di generazione di segnali, ciascuna delle quali comprendente un rispettivo generatore di un segnale ottico continuo ad una rispettiva lunghezza d'onda, differente da quella delle altre unità, atte ciascuna a generare un relativo segnale ottico ad impulsi ad una lunghezza d'onda; e
- 10 – mezzi di moltiplicazione di detti segnali ottici ad impulsi.

13) Sistema di trasmissione ad impulsi, secondo la rivendicazione 12, caratterizzato dal fatto che detta stazione di ricezione comprende mezzi di demoltiplicazione in lunghezza d'onda di detti segnali ottici ad impulsi.

14) Sistema di trasmissione ad impulsi, comprendente almeno una stazione di
15 trasmissione, una stazione di ricezione, una linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione ed almeno un amplificatore ottico serialmente collegato lungo detta linea a fibra ottica, caratterizzato dal fatto che detta stazione di trasmissione comprende una unità di generazione di segnali che comprende:

- 20 – un primo modulatore ottico di segnale, atto a modulare un segnale ottico con una serie di impulsi recanti una informazione codificata con una frequenza di ripetizione prefissata;
- un secondo modulatore ottico di impulsi, otticamente collegato a detto primo modulatore ottico di segnale, atto a modulare un segnale ottico
25 con una prima sequenza di impulsi periodici di durata prefissata T_{FWHM} , con detta frequenza di ripetizione prefissata;
- un generatore di un segnale ottico continuo, otticamente collegato a detti primo e secondo modulatore ottico, a lunghezza d'onda prefissata;
- 30 – in cui il rapporto T_{bit}/T_{FWHM} , tra l'inverso di detta frequenza di ripetizione prefissata T_{bit} e detta durata prefissata T_{FWHM} degli impulsi, è compreso

tra 6 e 10.

15) Sistema di trasmissione ad impulsi, comprendente almeno una stazione di trasmissione, una stazione di ricezione, una linea a fibra ottica collegante detta stazione di trasmissione e detta stazione di ricezione ed almeno un
5 amplificatore ottico serialmente collegato lungo detta linea a fibra ottica, caratterizzato dal fatto che comprende:

- una stazione di trasmissione di almeno due segnali ottici esterni, aventi rispettivi primi parametri spettrali e recanti ciascuno una informazione secondo una prima codifica digitale;
- 10 – una rispettiva unità di interfacciamento in corrispondenza a ciascuno di detti segnali ottici esterni, comprendente una unità di ricezione di detti segnali ottici esterni ed una unità di emissione di corrispondenti segnali ottici di lavoro a lunghezze d'onda prefissate, digitalmente codificati con l'informazione di detti segnali ottici esterni, in forma di impulsi RZ;
- 15 – un primo elemento conduttore ottico, avente una prima dispersione cromatica alle lunghezze d'onda di detti segnali di lavoro;
- un secondo elemento conduttore ottico, avente una seconda dispersione cromatica alle lunghezze d'onda di detti segnali di lavoro, di segno opposto a detta prima dispersione cromatica, serialmente collegato a detto primo elemento conduttore ottico;
- 20 – detta prima dispersione cromatica e detta seconda dispersione cromatica essendo di valori prefissati, tali che la dispersione cromatica complessiva è maggiore di zero alle lunghezze d'onda di detti segnali di lavoro.

25 16) Sistema di trasmissione secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che detti segnali di lavoro ad impulsi possiedono, per almeno una porzione del loro cammino di propagazione in uno di detti primo e secondo elemento conduttore ottico, una intensità di valore tale da causare una automodulazione di fase di detti segnali di lavoro.

30 17) Sistema di trasmissione secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal

fatto che detto amplificatore ottico possiede potenza di uscita per ciascun canale di valore tale da determinare, in una porzione di uno di detti primo e secondo elemento conduttore ottico, una intensità di valore tale da causare una automodulazione di fase di detti segnali di lavoro.

5 18) Sistema di trasmissione secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che detto primo elemento conduttore ottico è una fibra ottica a salto di indice.

10 19) Sistema di trasmissione secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che detto primo elemento conduttore ottico è una fibra ottica a dispersione non-zero.

20) Metodo di trasmissione ottica ad alta velocità, comprendente le fasi di:

- generare un segnale ottico;
- modulare detto segnale ottico con un primo segnale periodico ad una frequenza di trasmissione prefissata;
- 15 - modulare detto segnale ottico con un secondo segnale, recante una informazione codificata a detta frequenza di trasmissione prefissata;
- in cui detta fase di modulare detto segnale ottico con un primo segnale periodico ad una frequenza prefissata comprende applicare ad un modulatore ottico un segnale di pilotaggio comprendente detto segnale periodico a detta frequenza prefissata ed almeno una armonica di detta frequenza di trasmissione prefissata.

20 21) Metodo di trasmissione ottica ad alta velocità, comprendente le fasi di:

- ricevere un primo segnale ottico modulato, recante una informazione;
- convertire detto segnale ottico in un segnale elettrico recante detta informazione;
- 25 - modulare un secondo segnale ottico con una sequenza di impulsi, di prefissata durata temporale;
- modulare detto secondo segnale ottico con detto segnale elettrico recante detta informazione;
- 30 - alimentare detto secondo segnale ottico modulato con detta sequenza

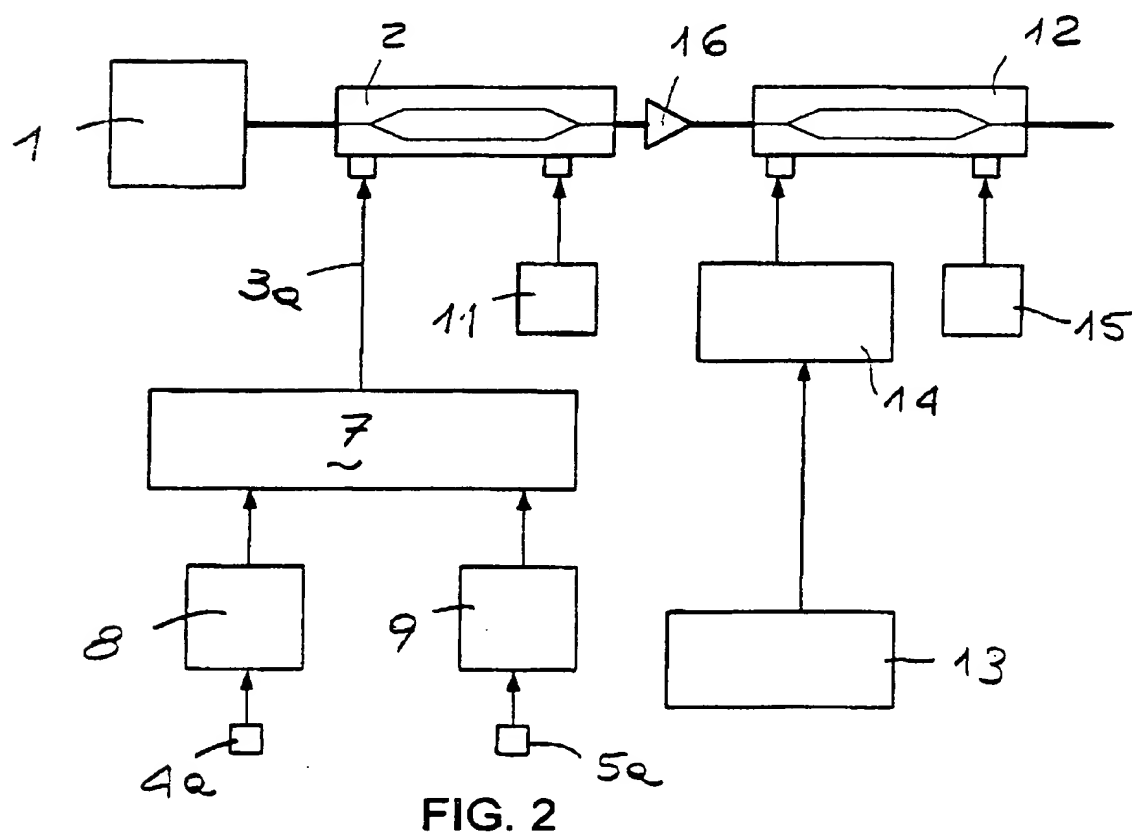
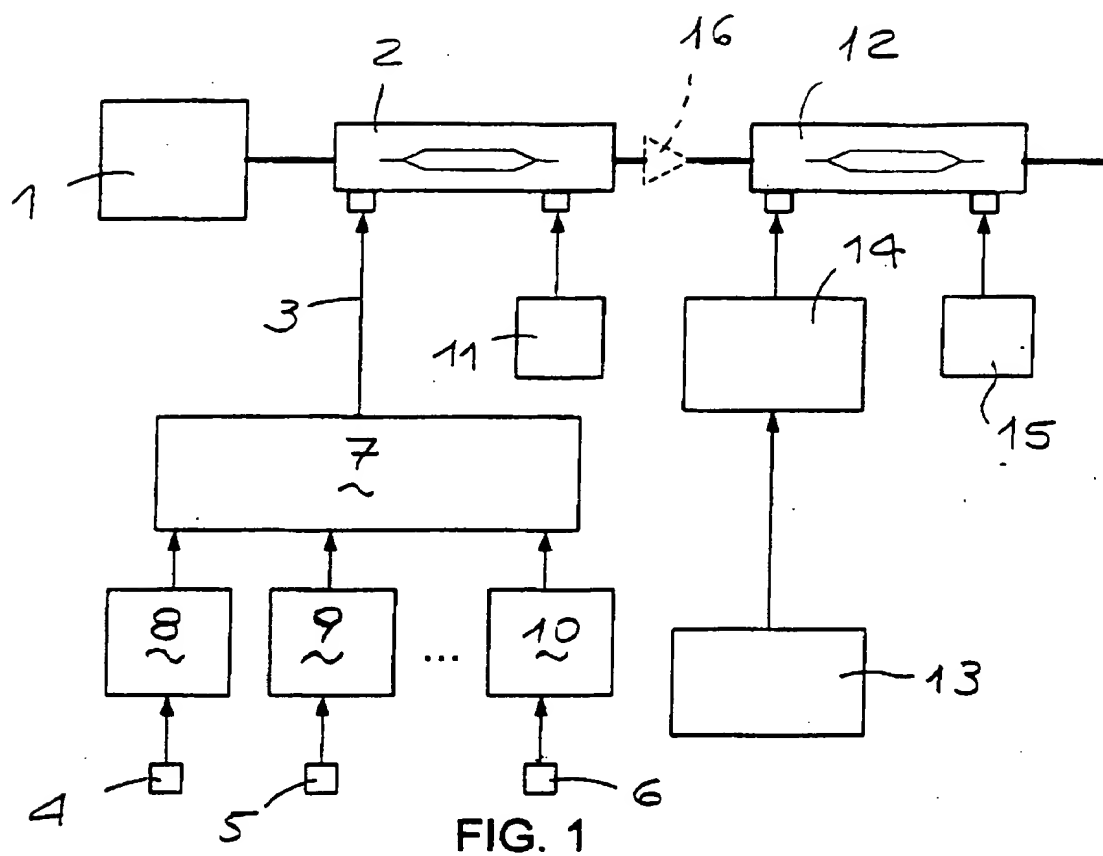
di impulsi e detto segnale elettrico in una linea ottica di trasmissione.

RIASSUNTO

Impulsi ottici solitonici o simil-solitonici di caratteristiche adatte alla propagazione in una linea ottica per una trasmissione di tipo RZ sono generati modulando un segnale ottico continuo (1) mediante un modulatore (2) sostanzialmente privo di chirping, in cui il segnale di pilotaggio del modulatore comprende almeno una frequenza (4) ed una sua armonica (5) sovrapposti tra loro (7).

Un sistema ottico di trasmissione ad alta velocità è reso indipendente dal tipo di trasmettitore o di segnali ad esso inviati, se esso comprende una unità di adattamento (32) ricevente gli impulsi ottici originali (30) ed in grado di generare corrispondenti segnali ad impulsi (63) di tipo RZ.

Fig. 9



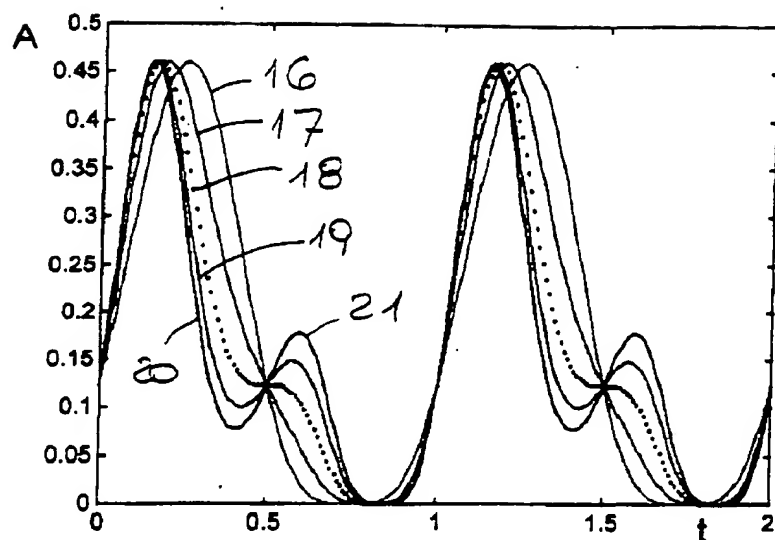


FIG. 3a

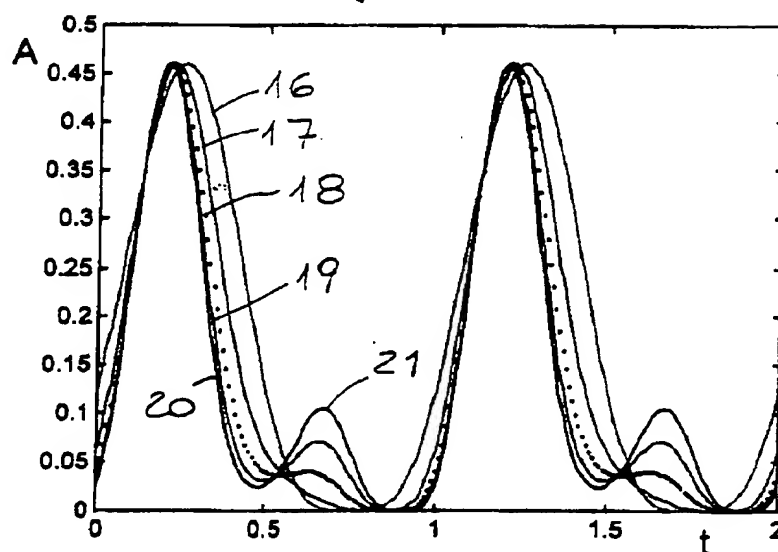


FIG. 3b

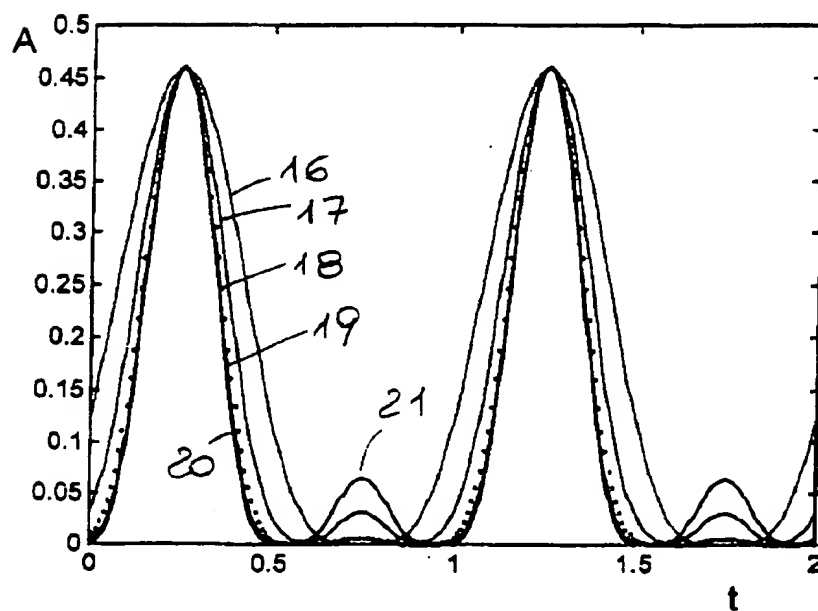


FIG. 3c

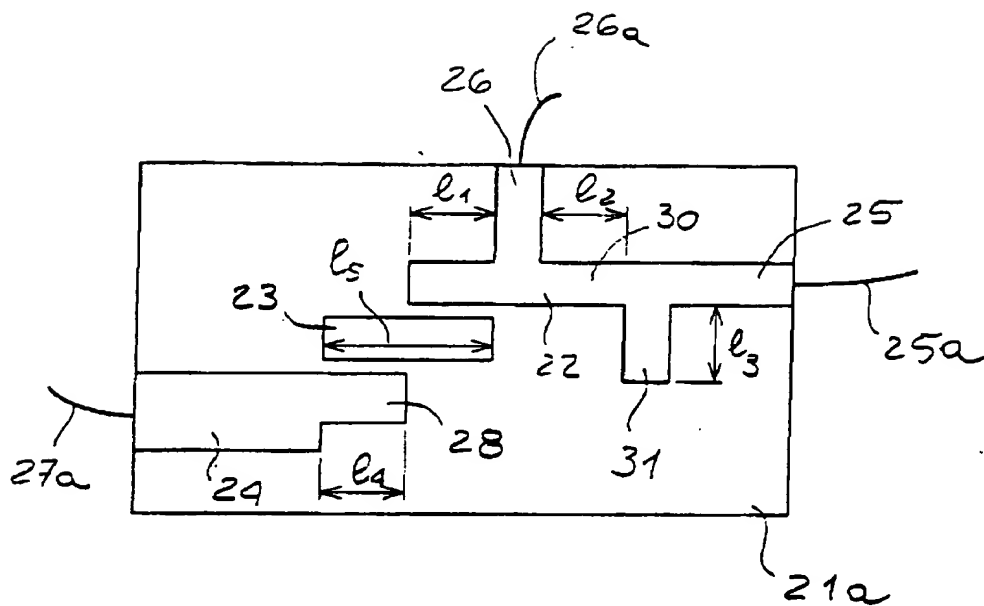


FIG. 4

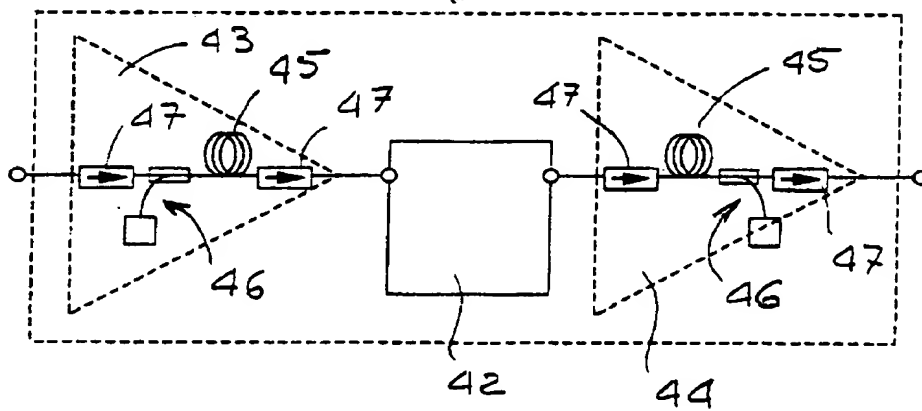


FIG. 8



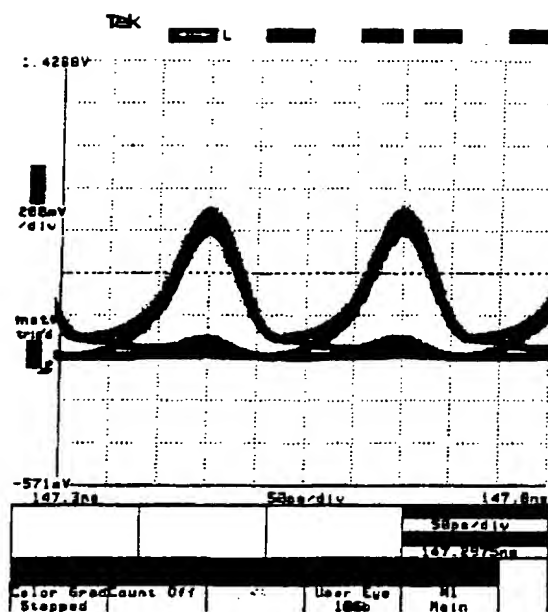


FIG. 6

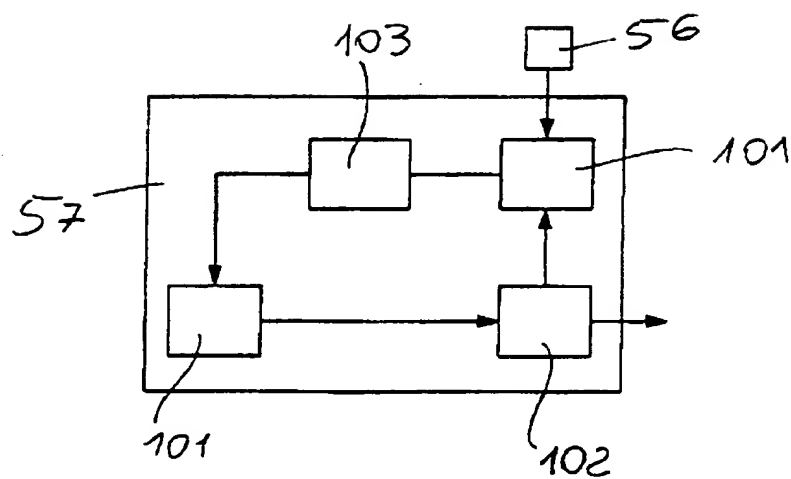


FIG. 10

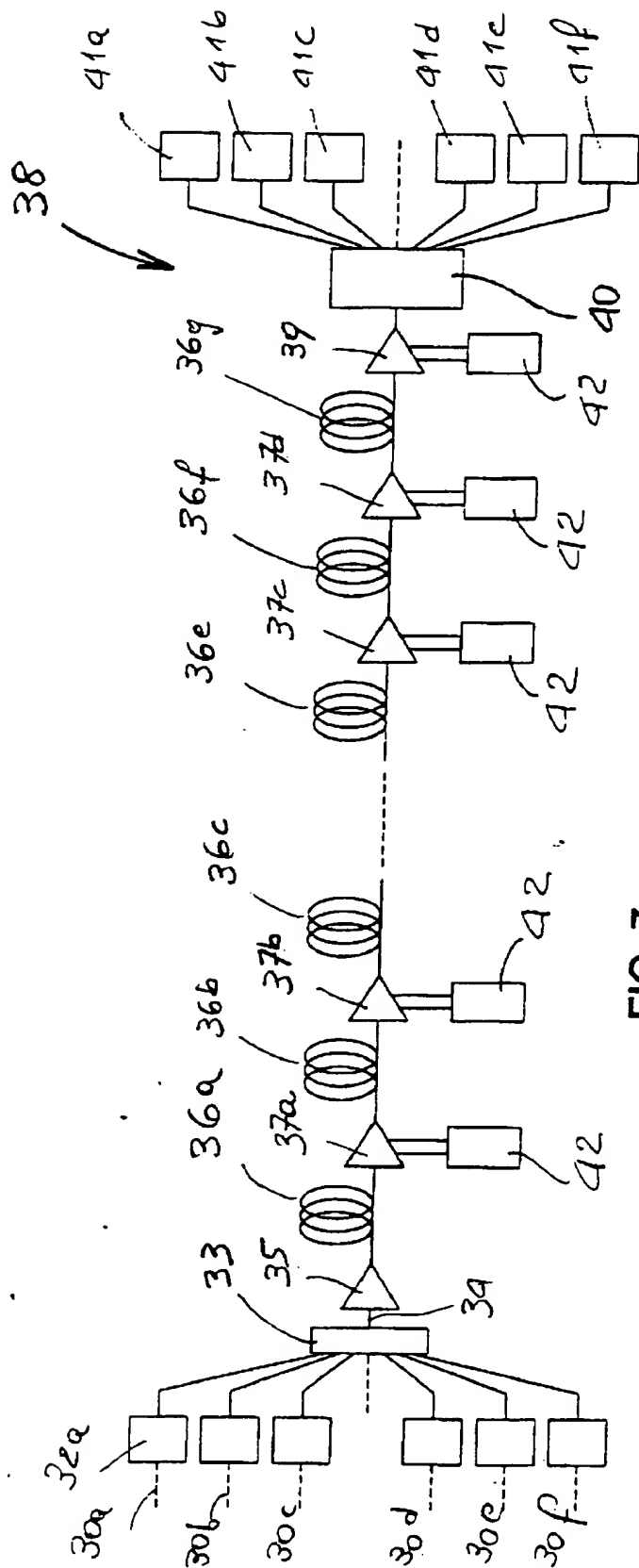


FIG. 7

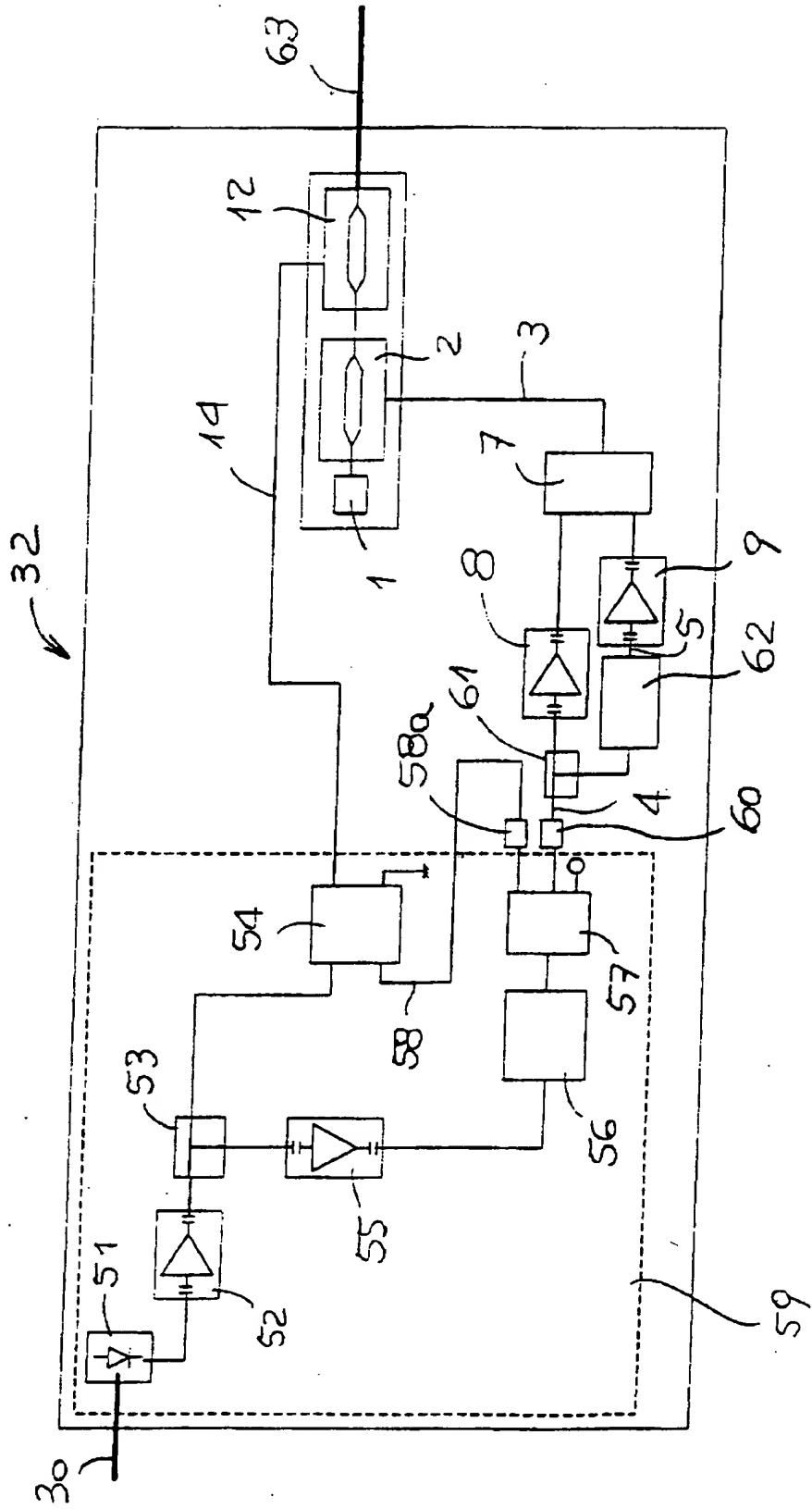


FIG. 9